

# Tecnología NIR para plantas de beneficio: optimización de resultados de calidad de aceites y subproductos para tomar decisiones estratégicas durante el procesamiento de fruto

NIR Technology for Palm Oil Mills: Optimization of Quality Results of Oils and By-Products to Take Strategic Decisions during Fruit Processing

**CITACIÓN:** Díaz-Rangel, C. A., Forero-Cabrera, N. M., Ramírez-López, L., González-Díaz, A., Fernández-Botía C. A. & García-Núñez, J. A. (2019). Tecnología NIR para plantas de beneficio: optimización de resultados de calidad de aceites y subproductos para tomar decisiones estratégicas durante el procesamiento de fruto. *Palmas*, 40(4), 179-206.

**PALABRAS CLAVE:** NIR espectro de radiación por infrarrojo cercano, laboratorio, planta de beneficio, predicción.

**KEYWORDS:** NIR near infrared radiation, laboratory, palm oil mill, prediction.

**CÉSAR AUGUSTO DÍAZ RANGEL**  
Asistente de Investigación, Programa de  
Procesamiento de Cenipalma

**NATHALIA MARÍA FORERO CABRERA**  
Especialista NIR, Büchi

**LEONARDO RAMÍREZ LÓPEZ**  
Especialista NIR, Büchi

**ALEXIS GONZÁLEZ DÍAZ**  
Auxiliar de Investigación, Programa de  
Procesamiento

**CARLOS ALBERTO FERNÁNDEZ BOTÍA**  
Director de Planta, Palmas del Cesar

**JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ**  
Coordinador, Programa de  
Procesamiento de Cenipalma

## Resumen

Conocer el estado de los procesos y la calidad de la materia prima, la cual se trabaja a diario en las plantas de beneficio del país, ha sido una de las necesidades del gremio palmero colombiano, de la mano con la implementación de tecnologías y metodologías enfocadas hacia la optimización. Esto lo que busca, finalmente, son puntos de partida para la toma de decisiones con suficiente fundamento técnico para salvaguardar la estabilidad financiera del negocio.

Se presenta este documento como compilado del trabajo realizado por la alianza Cenipalma-Büchi Labortechnik de Suiza, involucrando los equipos NIR FLEX N500, NIR Proximate y NIR Online, los cuales han sido utilizados como medio de calibración y validación de resultados en las plantas de beneficio de la Zona Central palmera del país.

Entre los temas de conocimiento dentro del proyecto, inicialmente se muestra el antecedente técnico en la agroindustria, posteriormente un apartado sobre técnicas analíticas para la determinación de variables a través de espectroscopía, modelos de predicción desarrollados por la alianza Cenipalma-Büchi, aplicaciones de los modelos de predicción desde la calidad de los aceites y el monitoreo de pérdidas de aceite en planta, monitoreo de pérdidas de aceites y múltiples parámetros de calidad, y los resultados parciales de evaluación técnica de los equipos NIR Flex N500 y NIR Proximate en las plantas de beneficio del país.

Para finalizar el compilado técnico de información sobre el proyecto, al igual que los logros alcanzados por la alianza de investigación, se sustentan los beneficios y potenciales de ahorro económico, gracias a la implementación de tecnologías NIR en planta de beneficio. Igualmente se genera el contraste entre las técnicas convencionales presentes *versus* los resultados inmediatos a través de los equipos NIR.

## Abstract

Knowing the state of the processes and the quality of the raw material which is processed daily in the Palm Oil Mills (POM) of Colombia, that has been one of the needs of the Colombian Oil Palm Growers, hand in hand with the implementation of technologies and methodologies focused on optimization, finally looking for representative points for decision making with sufficient technical basis to safeguard the financial stability of the business.

This document is presented as a compilation of the work carried out by the alliance of Cenipalma-Büchi. Labortechnik of Switzerland, involving the NIR FLEX N500, NIR Proximate and NIR Online equipment, calibration and validation of results.

Among the topics of knowledge within the project, the technical background in agribusiness is initially shown, then a section on analytical techniques for determining variables through spectroscopy, prediction models developed by the Cenipalma-Büchi alliance, model applications prediction from the quality of the oils and the monitoring of oil losses in the plant, monitoring of oil losses and multiple quality parameters, and finally the partial results of technical evaluation of the NIR Flex N500 and NIR Proximate equipment in the plants of benefit of the country.

In order to finalize the technical compilation of information about the project, as well as the achievements made by the research alliance, the benefits and potentials of economic savings are sustained thanks to the implementation of NIR technologies in the POMs. Likewise, the contrast between the present conventional techniques is generated, versus the immediate results through the NIR equipment.

---

## Introducción

La agroindustria del aceite de palma es el sector con mayor participación en el ámbito de las cosechas oleaginosas a nivel internacional, consolidándose durante el año 2018 con 74 millones de toneladas de aceite de palma crudo (CPO, por sus siglas en inglés) equivalente al 56 % del mercado de aceites (Fedepalma, 2019).

Esta oferta productiva está conformada principalmente por 28 países entre los cuales se encuentra Colombia como cuarto productor mundial con 1,6 millones de toneladas de CPO, por debajo de referentes como Indonesia y Malasia, con 41,5 y 20,5 millones de toneladas de CPO respectivamente (USDA, 2018).

En lo respectivo a la eficiencia para extraer el aceite a partir del fruto, considerando las pérdidas de

aceite en planta de beneficio, es decir, la tasa de extracción de aceite (TEA) para el referente de Malasia, durante el 2018, fue de 19,95 % por participación de al menos 400 plantas de beneficio (MPOB, 2019), en contraste con Colombia, en donde las 71<sup>1</sup> plantas de beneficio reportaron 21,70 % (Fedepalma, 2019). La TEA para dichas plantas representa uno de los factores de alto impacto financiero, dada su directa relación con el indicador de eficiencia para medición de pérdidas de aceite, el cual se ha logrado determinar a través de múltiples estudios por parte de Cenipalma en conjunto con las plantas de beneficio y las plantaciones (Fedepalma, 2016). Dicho indicador se encuentra antes de llegar a la planta de beneficio en alrededor de 4,5 % aceite/RFF, y en planta de beneficio en promedio en 1,7 % (Durán, 2004), para el total de 6,2 % de aceite perdido desde campo hasta el momento de enviar el aceite hacia los tanques de almacenamiento en planta de beneficio.

Al revisar la conformación del indicador de pérdidas de aceite en planta de beneficio, se encuentran identificadas diversas etapas del proceso en donde frecuentemente, se ha detectado esta pérdida por subproducto del proceso, es decir, en tusa, fruto adherido en tusas, fibra, nueces, condensados de esterilización, lodos de centrifugas, torta sistema de separación de dos fases (opcional) y efluentes totales. Igualmente, se han caracterizado las pérdidas de almendra en fibras, en cáscaras secas y húmedas.

Tanto la determinación de calidad de CPO y de aceite de palmiste crudo (CPKO, por sus siglas en inglés), como las pérdidas de aceite en planta de beneficio, cuentan con múltiples métodos de referencia soportados tanto en el manual de procedimientos de laboratorio desarrollado por Cenipalma (Cala *et al.*, 2011<sup>2</sup>), como en los métodos de la American Oil Chemists Society (AOCS), siendo este último la base de procedimientos para determinar en matrices oleosas (aceites): humedad, ácidos grasos libres (AGL), índice de deteriorabilidad del aceite (DOBI).

Estos procedimientos cuentan con serias oportunidades de mejora, desde la óptica de la generación de información para soportar la toma de decisiones en el control del proceso, dado que implican alta demanda de tiempo y mano de obra, reactivos y sustancias de alto riesgo para la salud humana y el ambiente, reportes continuos ante las entidades para regulación del uso de sustancias controladas<sup>3</sup>, múltiples utensilios de laboratorio que requieren altos inventarios, y no menos importante, la imposibilidad de utilizar la información para el control de procesos de forma oportuna.

Entre las tecnologías para determinación inmediata de parámetros físico-químicos se encuentran las NMR (Resonancia Magnética Nuclear, por sus siglas en inglés) y NIR (Radiación de Infrarrojo Cercano, por sus siglas en inglés), en donde la última permite obtener múltiples parámetros a partir del análisis de espectroscopía y respuesta óptica de una muestra líquida o sólida, con la previa calibración y conformación de modelos matemáticos de predicción. El proceso de calibración depende de la confiabilidad bajo la cual se realizan los procedimientos de referencia en el laboratorio, situación similar en cualquier otro tipo de tecnología analítica de respuesta instantánea.

Una vez se desarrollan los modelos de predicción, se obtienen resultados en cuestión de minutos por cada muestra analizada; incluso cada una, sean matrices oleosas o sólidas, puede presentar resultados en simultáneo según los modelos desarrollados, un ejemplo de ello es el análisis de una muestra de CPO (García-Sánchez, 2005), cuyos resultados obtenidos por los modelos desarrollados son: Ácidos Grasos Libres (AGL), humedad, DOBI, índice de yodo, índice de anisidina, índice de peróxidos, color, carotenos e índice de fósforo.

En contraste con lo anterior, para poder determinar las pérdidas de aceite en una planta de beneficio estándar para Colombia (capacidad instalada de procesamiento 30 t RFF/ha), deben realizar mediante extracción Soxhlet y la utilización de solvente (hexano, benceno, entre otras sustancias), la cuantificación de aceite presente en una muestra sólida, conformada por diferentes muestras durante el día de proceso,

---

1 Número de plantas de beneficio estimado según cifras del Sistema de Información Estadística del Sector Palmero (Sispa) a diciembre 2018.

2 Este manual fue desarrollado partiendo de información en PORIM (1986).

---

3 Control para el manejo de productos y sustancias químicas: unidad del Ministerio de Justicia en Colombia.

requiriendo alrededor de 4 a 5 horas para obtener una respuesta, la cual, generalmente, se conoce al día siguiente del procesamiento de fruto. Adicionalmente, el personal de laboratorio de la planta debe recolectar más muestras del proceso para lograr determinar otros parámetros de calidad, los cuales se divulgarán después de ese día.

En el escenario de la utilización de equipos NIR, la planta podría tomar la decisión de detener el proceso para ajustar equipos, reajustar condiciones de presión y temperatura, entre otras consideraciones, en la medida que conozca las variaciones del indicador de pérdidas y los parámetros de calidad en cada una de las etapas del proceso. Esto permitirá lograr ahorros considerables en tiempo y recursos financieros e incluso alcanzar la recuperación de la inversión de estos equipos en cuestión de meses, debido a que las pérdidas de aceite es uno de los factores con mayor impacto sobre la rentabilidad del negocio.

En este artículo se mostrarán los avances logrados por el Programa de Procesamiento en conjunto con la empresa de origen suizo, Büchi Labortechnik, organización con la cual se estableció un convenio de investigación a partir del 2016. Parte de este convenio involucró el desarrollo del proyecto de Medición en Línea del Potencial Industrial de Aceite (PIA) por proveedor de fruto, integrando la tecnología NIR Online, trabajo que se lleva a cabo junto con la planta de beneficio Agroince de la Zona Central. Este estudio será abordado en posteriores publicaciones.

El convenio de investigación ha involucrado la evaluación técnica de los equipos:

- NIR Flex N500 (FT-NIR)
- NIR Proximate (NIR dispersivo con matriz de diodos)
- NIR Online (NIR dispersivo con matriz de diodos)

El objetivo principal de la alianza de investigación Cenipalma-Büchi es la evaluación, aprovechamiento y determinación de nuevos usos de los diferentes equipos con tecnología NIR, los cuales fueron entregados a Cenipalma en calidad de préstamo, con el fin de empezar a generar nuevos modelos de predic-

ción de variables, a partir de los diversos productos obtenidos del beneficio de los racimos de la palma de aceite. Posteriormente se indicarán cada una de las etapas de desarrollo del proyecto, iniciando con la creación de modelos de predicción, partiendo de parámetros de referencia en laboratorio, validación y calibración de modelos; mejoramiento de eficiencia de predicción a partir del seguimiento a indicadores estadísticos; evaluación de equipos con modelos de predicción ajustados en las plantas de beneficio de la Zona Central palmera del país; y finalmente, la planeación del estudio con el fin de crear nuevos modelos de predicción para productos de alto interés para las plantas de beneficio, refinadoras de aceites y biodiésel, incluso con importante aplicabilidad en plantaciones de productores de fruto.

## Técnicas analíticas para determinación de variables a través de espectroscopía

A modo de definición, la espectroscopía como área dentro de la física surgió con el estudio de la interacción entre la radiación y la materia como función de la longitud de onda ( $\lambda$ ). En un principio se refería al uso de la luz visible dispersada según su longitud de onda, por ejemplo, por un prisma. En el año 1800 el astrónomo alemán *Sir William Herschel*, se interesó en saber cuánto calor podía pasar a través de diferentes filtros de colores con los que observaba el sol. Él notó que los colores tenían diferentes temperaturas y que la temperatura se incrementaba desde el color violeta hasta el color rojo (Figura 1).

Más tarde el concepto se amplió enormemente para comprender cualquier medida en función de la longitud de onda o de la frecuencia. Por ende, la espectroscopía podía referirse a las interacciones con partículas de radiación o a una respuesta a un campo alternante o frecuencia variante ( $\nu$ ). Una extensión adicional del alcance de la definición añadió la energía ( $E$ ) como variable, al establecerse la relación  $E=h\nu$  para los fotones. Un gráfico de la respuesta como función de la longitud de onda (o más comúnmente la frecuencia) se conoce como espectro. La espectrometría es la técnica espectroscópica para tasar la concentración o la cantidad de especies determinadas. En estos casos, el instrumento

que realiza tales medidas es un espectrómetro o espectrógrafo. En la Figura 2 se indica la conformación del espectro electromagnético, compuesto por diversos tipos de elementos presentes en la cotidianidad.

La espectrometría a menudo se usa en física y química analítica para la identificación de sustancias mediante el espectro emitido o absorbido por las mismas. Durante la Segunda Guerra Mundial y en los 50 se desarrollaron sensores infrarrojos para detectar

tropas en el campo de batalla. En los 70 resurgió el uso del NIR cuando K. H. Norris (1996) (USDA) intentó con un espectrómetro medir el contenido de humedad de granos de cereales intactos, pero se dio cuenta de que también podía medir el contenido proteico de estos con mejor precisión respecto a otros métodos. Durante los 90 el desarrollo de herramientas computacionales, matemáticas y estadísticas impulsó el desarrollo y aplicación de la espectrometría.

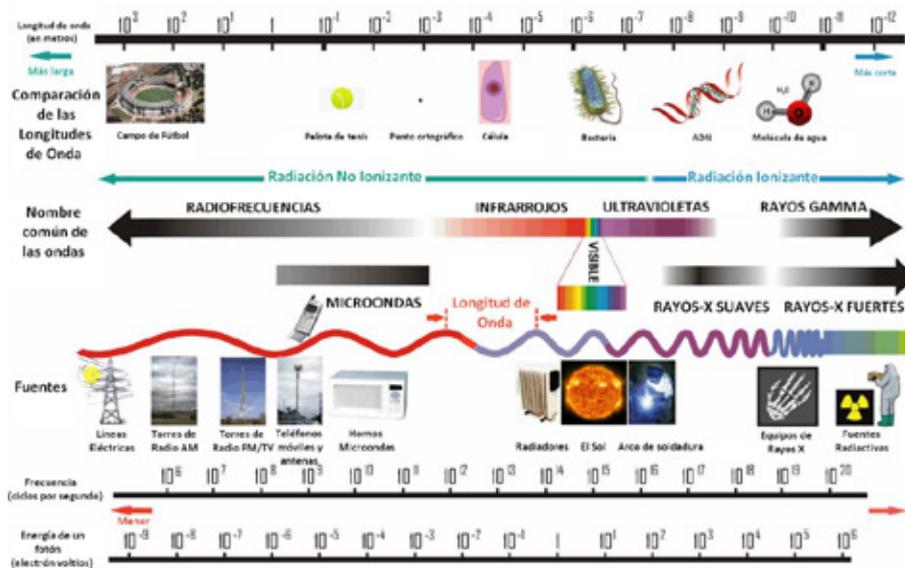
**Figura 1.** Cristal tipo prisma, a través del cual la luz se descompone en colores básicos

Fuente: tomado de Ríos-Castro (2012)



**Figura 2.** Espectro electromagnético

Fuente: tomado de departamento de Física Aplicada, Universidad de Sevilla España. (<http://laplace.us.es/wiki/index.php?title=Archivo:Espectro-electromagnetico.jpg&limit=50#filehistory>)



## Espectrometría de infrarrojo cercano (NIR)

La espectrometría infrarroja se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional.

Si la molécula recibe luz con la misma energía de esa vibración, entonces esta luz será absorbida si se dan ciertas condiciones. Para que una vibración aparezca en el espectro infrarrojo, la molécula debe someterse a un cambio en su momento dipolar durante la vibración. En particular, una aproximación de Born-Oppenheimer y aproximaciones armónicas; es decir, cuando el hamiltoniano molecular correspondiente al estado electrónico estándar puede ser aproximado por un oscilador armónico cuántico en las cercanías de la geometría molecular de equilibrio, las frecuencias vibracionales de resonancia son determinadas por los modos normales correspondientes a la superficie de energía potencial del estado electrónico estándar. No obstante, las frecuencias de resonancia pueden estar, en una primera aproximación, en relación con la longitud del enlace y las masas de los átomos en cada extremo del mismo.

Con el fin de hacer medidas en una muestra, se transmite un rayo monocromo de luz infrarroja a tra-

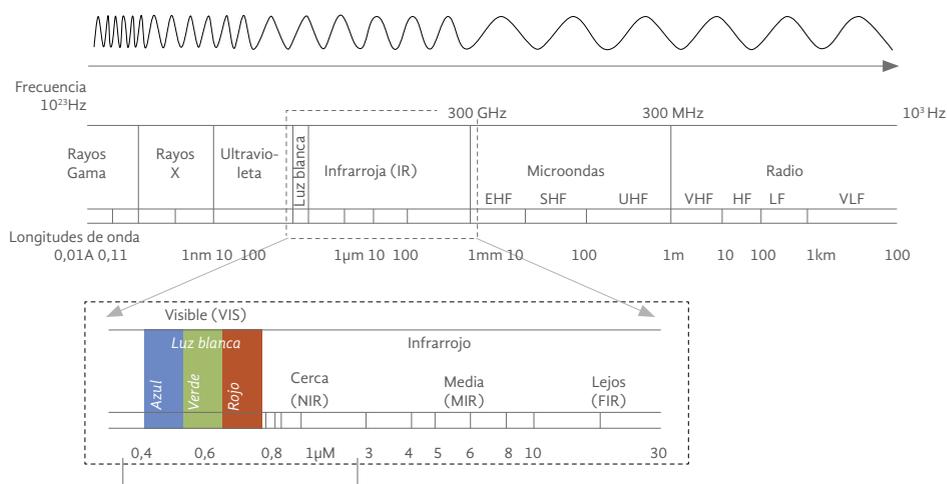
vés de la muestra, y se registra la cantidad de energía absorbida. Repitiendo esta operación en un rango de longitudes de onda de interés (por lo general,  $4.000-400\text{ cm}^{-1}$ ) se puede construir un gráfico. Al examinar el gráfico de una sustancia, un usuario experimentado puede obtener información sobre la misma.

Esta técnica funciona casi exclusivamente en enlaces covalentes, y se usa mucho en química, en especial en química orgánica. Se pueden generar gráficos bien resueltos con muestras de una sola sustancia de gran pureza. Sin embargo, la técnica se utiliza habitualmente para la identificación de mezclas complejas.

La porción infrarroja del espectro electromagnético, de acuerdo con la Figura 3, se divide generalmente en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, llamado así por su relación con el espectro visible. La energía más cercana al infrarrojo (IR), aproximadamente  $14.000-4.000\text{ cm}^{-1}$  ( $0,7-2,5$  longitud de onda  $\mu\text{m}$ ) puede provocar vibraciones armónicas. El infrarrojo medio, aproximadamente  $4.000-400\text{ cm}^{-1}$  ( $2,5-25\text{ }\mu\text{m}$ ) se puede utilizar para estudiar las vibraciones fundamentales y la estructura rotacional-vibratoria asociada. El infrarrojo lejano, aproximadamente  $400-10\text{ cm}^{-1}$  ( $25-1000\text{ }\mu\text{m}$ ), que se encuentra adyacente a la región de microondas, tiene poca energía y se puede utilizar para espectroscopía de rotación. Los nombres y clasificaciones de estas subregiones son convenciones, y se basan únicamente en las propiedades moleculares o electromagnéticas relativas.

**Figura 3.** Espectro electromagnético con énfasis en espectro infrarrojo

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi. Espectro infrarrojo cercano entre 120 a 400 THz, longitud de onda entre 800 y 2.500 nm. Traducido por Fedepalma.



El efecto de la energía transmitida por la luz sobre las moléculas de las matrices sólidas, líquidas y gaseosas permite establecer la existencia de una coincidencia entre la frecuencia de la energía excitante y la frecuencia de vibración natural de la molécula, por ende, esta molécula absorbe dicha energía. Cuando la energía electromagnética encuentra una sustancia, la misma es absorbida o transmitida dependiendo de su frecuencia y la estructura molecular de la misma. Por lo anterior, las vibraciones moleculares se diferencian entre estiramiento simétrico, estiramiento asimétrico y flexión.

La cantidad de energía absorbida puede ser diferente para cada frecuencia (longitud de onda). Esto normalmente se traduce en picos de absorción de energía.

### Regiones de absorbanza características

Los espectros NIR se caracterizan por picos amplios y superpuestos de armónicos y bandas combinadas (Figura 4), en donde las que son observadas en la región NIR, provienen principalmente de vibraciones de moléculas con enlaces de átomos de hidrógeno: CH (grasa), OH (humedad), NH (proteína). De

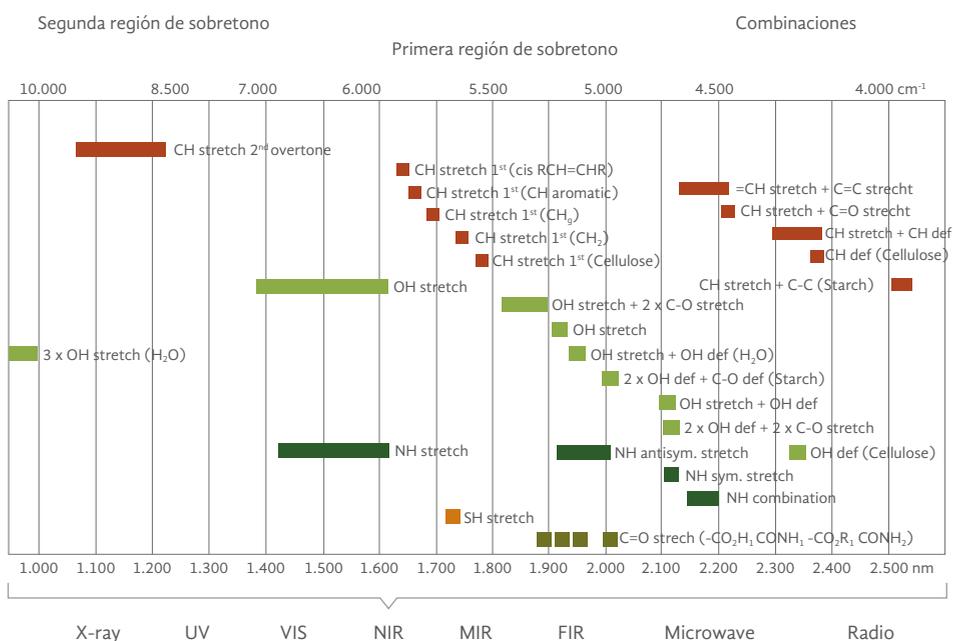
acuerdo con lo anterior, es posible caracterizar todos los productos y subproductos obtenidos del beneficio de materiales orgánicos, es decir, cosechas en general en lo respectivo a las regiones características mediante el análisis NIR.

### Espectrometría de resonancia magnética nuclear (NMR)

Por otro lado, la espectrometría de resonancia magnética nuclear es una herramienta que se utiliza con frecuencia en el análisis de alimentos lipídicos, grasas y aceites (Linden, 1996). NMR es una técnica que explota las propiedades magnéticas de ciertos Núcleos. Las aplicaciones más importantes para su uso en química orgánica son la espectrometría RMN de protones y la de carbono-13. En principio, la RMN es aplicable a cualquier núcleo que posea espín.

Pueden obtenerse muchos tipos de información mediante un espectro RMN. Al igual que se utiliza la espectrometría de infrarrojos para identificar grupos funcionales, el análisis de un espectro RMN unidimensional proporciona información sobre el número y tipo de entidades químicas en una molécula.

**Figura 4.** Regiones de absorbanza características, a través de tecnologías NIR



Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi. Adaptado de Burns & Ciurczak (2007)

El impacto de la espectrometría RMN en las ciencias naturales ha sido sustancial. Puede utilizarse, entre otras cosas, para estudiar mezclas de analitos, para comprender efectos dinámicos como el cambio en la temperatura y los mecanismos de reacción, y es una herramienta de valor incalculable para la comprensión de la estructura y función de las proteínas y los ácidos nucleicos. Este tipo de espectrometría se puede aplicar a una amplia variedad de muestras, tanto en solución como en estado sólido.

## Equipos e instrumentos

De acuerdo con el convenio de investigación celebrado entre Cenipalma y Büchi, se llevó a cabo la evaluación analítica e instrumental de los equipos NIR Flex N500 y NIR Proximate, a partir del análisis de muestras de CPO y subproductos generados en este, durante el procesamiento de racimos de fruto en la planta.

### NIR FLEX N500

Como principio de funcionalidad el NIR Flex N500 es un espectrómetro de infrarrojo cercano por transformación de Fourier (FT-NIR), implementado para identificar y cuantificar analitos de interés. La Figura 5 corresponde al equipo NIR FLEX N500, evaluado inicialmente en el laboratorio de Procesamiento de Ceni-

palma, posteriormente llevado hacia la Zona Central palmera para su evaluación en la planta de beneficio.

La forma más simple de un interferómetro es el clásico Michelson<sup>4</sup>, que consiste en un divisor de haz y dos espejos planos mutuamente perpendiculares, uno que permanece estático y otro que se mueve. El divisor de haz refleja parte de la energía NIR de la fuente (típicamente una bombilla halógena) en cada espejo. Los haces reflejados se recombinan en el divisor de haces y se dirigen hacia fuera. Cuando la distancia entre el divisor de haz y los dos espejos es equidistante, los dos haces interfieren constructivamente. La interferencia entre los haces con una diferencia de trayectoria óptica (es decir, a medida que se desplaza el espejo móvil) crea un interferograma. Este interferograma invisible, cercano al infrarrojo, interactúa con las moléculas de una muestra, generando una realimentación característica que se capta a través de una celda de medición por un detector y se procesa matemáticamente, a través de la transformada de Fourier en un espectro. Este es característico para una muestra dada y permite la identificación, así como la cuantificación de sus componentes. En la Figura 6 se muestra el esquema funcional del equipo NIR Flex N500.

- 
- 4 El interferómetro de Michelson, inventado por Albert Abraham Michelson, en 1880, permite medir distancias con una precisión muy alta.

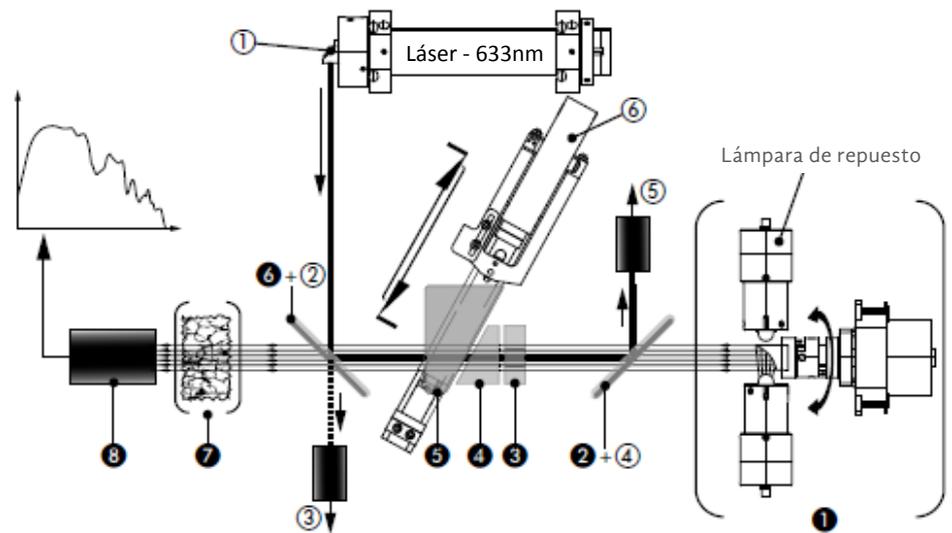
**Figura 5.** Equipo NIR FLEX N500 FT-NIR

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi



**Figura 6.** Esquema de funcionamiento equipo NIR Flex N500 FT-NIR

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi



A continuación, se presenta el modo en cómo se generan los interferogramas en el proceso compuesto del instrumento, a partir del esquema de la Figura 1.

**Paso 1.** Polarización de la salida de la fuente de luz. El polarizador (2) genera una salida de polarización bien definida de la luz polarizada indefinida, emitida por la fuente de luz (1). Así, solo se transmite luz polarizada diagonalmente.

**Paso 2.** Separación de haz y polarización ortogonal. La luz polarizada entra en un bloque de refracción doble (comparador) (3). Aquí, la luz se divide en dos componentes ortogonalmente polarizados con un pequeño desplazamiento de fase estático.

**Paso 3.** Generación del cambio de fase en curso. Un conjunto de dos cuñas de doble refracción está dispuesto después del comparador. La cuña (4) es estacionaria, mientras que la cuña (5) es desplazada constantemente hacia atrás y hacia delante por un mecanismo lineal rápido. El movimiento y la disposición geométrica dan un cambio de espesor en el trayecto de la luz. Esto conduce a un cambio de fase continuo entre los haces de luz.

**Paso 4.** La recombinación de haz y salida de interferograma. Un segundo polarizador (6) convierte los haces desfasados en una sola salida de luz con variación de intensidad-el interferograma.

### Ventajas de un equipo NIR o interferómetro de polarización FT-NIR

- Medición simultánea de todos los números de onda y mayor rendimiento de luz, lo que proporciona una relación señal/ruido mejorada.
- Alta resolución de longitud de onda, que conduce a una buena transferencia de datos (es decir, transferencia de calibración de modelos de predicción) y una selectividad mejorada para características espectrales con ancho de banda estrecho.
- Interferómetro de haz simple sin divergencia típica de haz doble para una alineación del haz mecánica y estable a la temperatura (diseño más robusto que el interferómetro estándar de Michelson).
- Debido a que hay menos componentes ópticos para atenuar la radiación, más potencia llega al detector, proporcionando el beneficio de una mejor relación señal/ruido. Debido a que la resolución a longitudes de onda discretas es mucho mejor, se pueden detectar elementos que interactúan dentro de bandas muy estrechas (mejor selectividad).

- Además de mostrar los beneficios de rendimiento de la tecnología FT, el equipo NIR-Flex-N500 es una buena opción para un entorno de I+D o laboratorio donde los tipos de muestra son variados (por ejemplo, líquidos y sólidos). El N500 tiene módulos de muestreo intercambiables (por ejemplo, celdas de medición de fibra óptica, sólidos y líquidos), y complementos de muestreo (por ejemplo, soportes para placas de Petri y carruseles de viales de 6 posiciones) para optimizar el rendimiento de la tecnología en una variedad de aplicaciones. En la Tabla 1 se indican los datos técnicos del equipo NIR Flex N500.

## NIR Proximate

Del tipo NIR Dispersivo, el instrumento genera un haz invisible de luz NIR (o visible) que se enfoca en la muestra a investigar. La luz reflejada de la muestra es recogida y espacialmente separada por un elemento de difracción. La luz difractada se dirige a un detector

de red de diodos. Las señales del detector se procesan y se construye un espectro de reflectancia. Este espectro se somete a un procesamiento adicional para calcular los constituyentes requeridos. En dos palabras, los equipos bajo esta tecnología son descritos como veloces, por la rapidez en la entrega de predicción y proceso de calibración, y robustos, dado su alto grado de resistencia a ambientes agrestes, incluso son utilizados para medición en línea dentro de procesos (Figura 7).

El equipo puede ser configurado con una selección de presentación de la muestra, *Up View* y *Down View*.

*Up View*: en esta opción la luz se dirige y se recoge de la parte inferior de la muestra. La luz NIR pasa a través de la base de una placa de Petri de vidrio, antes de interactuar con la muestra bajo evaluación. La medición en *Up View* tiene la ventaja de que permite presentar una superficie más consistente al equipo, asegurando una salida de medición precisa. Además, cuando se usa junto con un adaptador de transflectancia, también es posible medir líquidos utilizando la opción de vista ascendente.

**Tabla 1.** Datos técnicos de la unidad base NIR Flex N500.

Unidad base espectrómetro FT-NIR	
Dimensiones (ancho x profundo x alto)	350x250x450 mm
Rango espectral	800-2.500 nm
	12.500-4.000 $\text{cm}^{-1}$ (Si no se especifica diferentemente para la célula de medición)
Resolución	8 $\text{cm}^{-1}$ (con apodización de vagones)
Tipo de interferómetro	Interferómetro de polarización con cuñas $\text{TeO}_2$
Exactitud del número de onda	$\pm 0,2 \text{ cm}^{-1}$ (medida con una celda de gas HF a una temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Relación señal/ruido	10.000 (ruido pico a pico de una línea de base lineal corregida)
Número de exploraciones/seg.	2-4 (depende de la resolución)
Tipo de lámpara/vida de la lámpara (MTBF <sup>1</sup> )	Lámpara halógena de tungsteno / 12.000 h (2x6.000 h)
Tipo de láser	12 VDC HeNe, longitud de onda a 632.992 nm
Convertidor digital analógico	24 bit
Alimentación eléctrica	100-230 VAC $\pm 10 \%$ , 50/60 Hz, 350 W
Conexión Ethernet	100 Mbit/s

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi.

1 MTBF: abreviatura en inglés de Mean Time Between Failures, en español Tiempo Medio entre Fallas.

**Figura 7.** Equipo NIR Proximate

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi



**Down View:** con esta opción, la luz se enfoca y se recoge desde la superficie superior de la muestra. Ofrece la ventaja de que la luz NIR no interactúa con el contenedor de las muestras, evitando ruidos innecesarios en las lecturas, de gran utilidad en ambientes en donde no es permitido el uso de cristalería o no es apto para la manipulación de elementos delicados. Además, permite el uso de platos de muestra de gran volumen. Estos son particularmente útiles con muestras que no son homogéneas, ya que la medición se promedia sobre un área de muestra mucho más grande.

### Características de un equipo NIR dispersivo

En un sistema NIR dispersivo (Figura 8), la luz se emite constantemente desde una fuente NIR (típicamente una lámpara halógena de tungsteno) sobre una muestra. La luz reflejada difusamente de la muestra se dirige a un elemento dispersivo (por ejemplo, rejilla estacionaria) y se detecta la luz monocromática distribuida espacialmente resultante. En lugar de un monocromador en movimiento y un solo detector, se puede usar una matriz de diodos. Esta generalmente consta de 256 diodos, cada uno de los cuales recoge la intensidad de un cierto rango de longitud de onda dependiendo de su posición espacial. Estas señales de diodos individuales se denominan común-

mente píxeles. La división de la intensidad medida ( $I$ ) por la intensidad de un espectro de referencia blanco ( $I_0$ ), así como la conversión de píxeles a una escala de longitud de onda, da como resultado el llamado espectro,  $I / I_0$  trazado frente a  $\text{nm}$  o  $\text{cm}^{-1}$ .

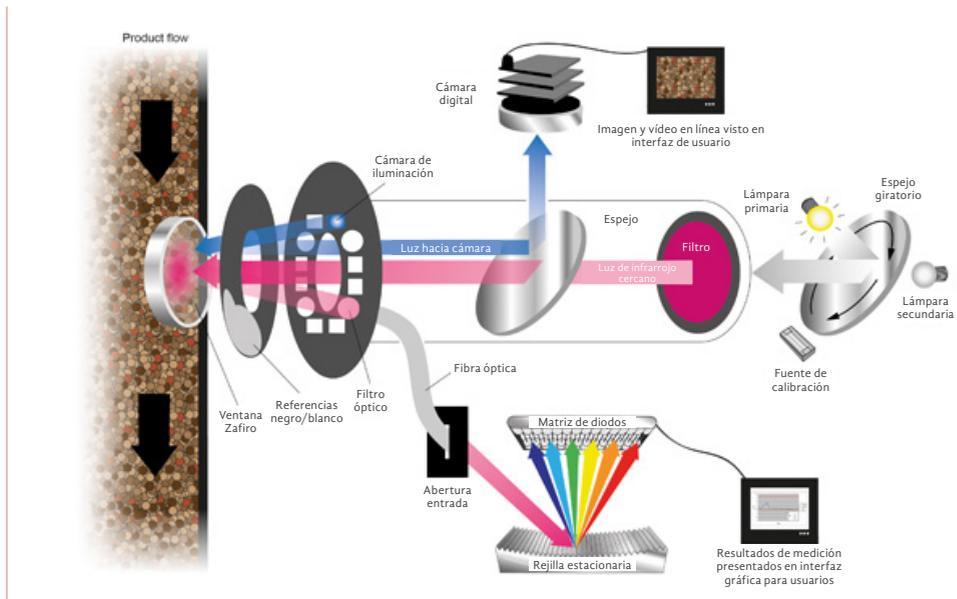
### Ventajas de un equipo NIR Dispersivo con matriz de diodos

La utilización de matrices de diodos da lugar a la detección de un rango de longitud de onda específico en milisegundos. Un promedio de hasta 200 espectros por cada segundo, mejora la relación señal-ruido y permite la detección de productos de movimiento rápido en tuberías o cintas transportadoras. Debido a que los analizadores de procesos basados en matriz de diodos no contienen partes móviles, son robustos por diseño, lo que los hace adecuados para condiciones industriales difíciles como vibraciones, temperaturas extremas o humedad (Figura 9).

En un entorno de proceso, los analizadores de proceso de matriz de diodos son deseables sobre las tecnologías de escaneo o basadas en interferómetro (Figura 9). Las ruedas giratorias de filtro de longitud de onda o los espectrómetros de Transformada de Fourier (FT) con partes móviles requieren tiempos de medición más largos y la calidad de los datos medidos depende de condiciones de medición estables.

**Figura 8.** Esquema de funcionamiento equipo NIR Proximate (NIR dispersivo con matriz de diodos)

Fuente: adaptado de Perten Instruments



**Figura 9.** Equipos NIR por tecnología de dispersión y matriz de diodos

Fuente: adaptado de sitio <https://buchinir.com/>



El analizador BUCHI NIR-Online (izquierda) y el Proximate NIR (derecha) utilizan el mismo banco óptico y están equipados para manejar los entornos de procesamiento más extremos.

El Proximate nació de un llamado por una solución en línea de menor costo y mayor calificación IP para aplicaciones de alimentación humana y alimentos concentrados para animales (balanceado). La designación IP-69 del Proximate indica una protección completa contra partículas de polvo de hasta 4 micras de tamaño y protección contra el agua proyectada desde una boquilla potente en cualquier dirección. El instrumento se puede lavar exactamente de la misma manera que otras máquinas de la planta.

Al igual que el NIR-Online, el Proximate ofrece mediciones rápidas, lo que permite un mayor rendimiento

y menos tiempo de inactividad en el laboratorio o en la planta. Debido a que el banco óptico de NIR-Online y Proximate es idéntico, la transferencia de datos y calibración también podría proporcionar una transferencia de método más rápida, de aplicaciones en línea en el proceso a aplicaciones a nivel de laboratorio.

### Etapas del convenio de investigación entre Cenipalma y Büchi

En la Figura 10 se muestra la línea de tiempo del proyecto llevado a cabo por Cenipalma, considerando los siguientes alcances logrados entre el 2017 hasta la actualidad:

**Tabla 2.** Datos técnicos de la unidad base NIR PROXIMATE.

Unidad principal integrada espectrómetro y PC táctil	
Dimensiones (AxPxH)	260x435x500 mm
Peso	23 k
Clase de protección	IP69
Consumo eléctrico	60 W
Frecuencia	50/60 Hz
Detector NIR	InGaAs, enfriamiento termoeléctrico
Detector VIS	Sí
Rango espectral NIR	900-1.700 nm
Resolución NIR	7 nm
Rango espectral VIS	400-900 nm
Resolución VIS	10 nm
Tiempo de medición	15 s (Configurable por el usuario)
Tipo de lámpara	Tungsteno-halógena
Vida útil promedio lámpara (MTBF)	9.000 horas
Tamaño pantalla táctil	10,4 pulgadas
PC incorporado en unidad sensor	Windows 10 IoT de última generación con interfaz amigable
Software y autocalibración	NIRwise con bases de datos en Microsoft SQL Server Autocal permite generar modelos a partir de 3 muestras

Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi.

**Figura 10.** Línea de tiempo del proyecto de evaluación de tecnologías NIR por Cenipalma



Fuente: presentación de resultados proyecto Cenipalma y Büchi

**Tabla 3.** Principales actividades realizadas durante el proyecto.

Funciones	Actividades
Manejo del equipo NIRFLEX N500 (equipo puesto en laboratorio de procesamiento Zona Oriental)	Contratación de Nathalia M. Forero C. <sup>5</sup> , quien posteriormente se encargó de la realización de análisis, calibración de modelos, creación de nuevos modelos, ajustes metodológicos, entre otros aspectos del proyecto. Entrega de equipo y accesorios. Proceso de capacitación a cargo de Margarete de Koning (funcionaria Büchi-Brasil).
Elaboración del protocolo de investigación Cenipalma-terceros	Definición de los procedimientos de recolección y almacenamiento de muestras. Definición del procedimiento de análisis de resultados.
Análisis convencionales de laboratorio	Definición de las metodologías y obtención de medidas de referencia para (Alexis González D.): <ul style="list-style-type: none"> <li>• CPO: humedad, ácidos grasos libres (AGL), impurezas e índice de deterioro a la blanqueabilidad (DOBI).</li> <li>• Tusa prensada y fibra: humedad y pérdida de aceite.</li> <li>• Fruto y mesocarpio: humedad, cantidad de aceite (potencial de aceite) y perfil de ácidos grasos (ácido palmítico y ácido oleico).</li> <li>• Cuesco y almendra: cantidad de aceite.</li> </ul>
Adquisición de firmas espectrales con NIRFLEX N500	Análisis espectral de muestras de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tusa prensada</li> <li>• Fibra</li> <li>• Aceite de palma crudo</li> <li>• Fruto de palma de aceite</li> <li>• Mesocarpio</li> <li>• Cuesco</li> <li>• Almendra</li> </ul>
Elaboración de modelos (a partir de mediciones con NIRFLEX N500)	Construcción de calibraciones para parámetros de muestras de CPO, tusa prensada y fibra. Construcción de calibraciones preliminares para humedad, potencial de aceite y perfil de ácidos grasos en frutos, mesocarpio, almendra y cuesco.
Manejo del equipo NIR Proximate (equipo puesto en laboratorio de procesamiento Zona Oriental)	Entrega de equipo y accesorios. Proceso de capacitación a cargo de Leonardo Ramírez y Margarete de Koning (funcionarios de Büchi).
Optimización Transflectance Cover	Estimación del transflectance cover óptimo para medición en muestras de aceite de palma crudo.
Adquisición de firmas espectrales con NIR Proximate	Análisis espectral de muestras de aceite de palma crudo de diferentes zonas de Colombia.
Elaboración de modelos (a partir de mediciones con NIR Proximate)	Construcción de calibraciones preliminares para humedad, AGL, impurezas y DOBI en muestras de CPO.
Elaboración función de transferencia NIRFLEX N500 a NIR Proximate	Mediciones espectrales de muestras en NIRFLEX N500 y muestras en NIR Proximate. Aplicación del algoritmo para construcción de la función de transferencia.
Evaluación NIR Proximate en planta de beneficio (Tanto NIR Proximate como NIR Flex son trasladados a la Zona Central)	Elaboración del procedimiento operativo (SOP) para medición de muestras de CPO con NIR Proximate en planta de beneficio. Capacitación a pasante de la planta de beneficio Palmas del Cesar en manejo del equipo NIR Proximate.
NIR FLEX N500 y NIR Proximate en Palmas del Cesar	Ambos equipos son llevados a la planta con el fin de validar los modelos anteriormente generados en el laboratorio de procesamiento, obteniendo la recalibración y mejoramiento de los estadísticos de predicción.
NIR Proximate en Palmeras de Puerto Wilches	Se identifican diferencias en los modelos de predicción para matrices oleosas y sólidas procedentes de cultivares híbridos.
NIR Proximate en Extractora Monterrey	Se empiezan a construir nuevos modelos de predicción para productos y subproductos procedentes de cultivares híbridos.
NIR Proximate en Extractora Palma y Trabajo (Grupo Daabon)	Se continua en proceso de construcción y validación de modelos de predicción para matrices procedentes de cultivares híbridos. Se actualiza el modelo para determinación de potencial de aceite, dado que para cultivares <i>Elaeis guineensis</i> solamente se considera aceite en fruto, caso contrario para híbridos, se deben considerar: frutos normales, frutos partenocárpicos e impurezas.

5 Ing. Agrícola Universidad Nacional de Colombia, magíster en ingeniería agrícola, especialista de Büchi Labortechnik Suiza.

## Metodología de medición

### Análisis fisicoquímicos base para el desarrollo de los modelos analíticos por infrarrojo

Para el análisis de los parámetros de calidad del aceite mencionados a continuación, se hace uso de métodos de referencia de las Normas internacionales de la AOCS Methods y MPOB Test methods. Los análisis a realizar por el laboratorio de procesamiento se indican en la Tabla 4.

### Obtención de información a partir de espectros para creación de modelos de predicción

En general, la medición de la absorción de energía en el infrarrojo cercano (NIR) para muestras translúcidas se realiza en modo de transmitancia, mientras que estas mediciones en muestras de matrices opacas o de dispersión de luz se realizan en modo de reflexión difusa. En ambos casos, es difícil identificar características espectrales únicas relacionadas con

componentes químicos individuales dentro de una matriz. Esto se debe a que los diferentes componentes de una matriz data suelen presentar características de absorción amplias que se traslapan entre sí (referencias), lo que a su vez hace difícil la interpretación de los espectros NIR. Sin embargo, es posible cuantificar diferentes componentes por medio de modelos estadísticos. En otras palabras, estos modelos traducen datos espectrales del NIR de una determinada muestra (p. ej. aceite de palma crudo) en información relevante (p. ej. ácidos grasos libres). Los espectros NIR que se usan para desarrollar los modelos generalmente son preprocesados para maximizar la relación entre la variable a modelar y las variables NIR.

Los modelos NIR son calibrados usando algoritmos de reconocimiento de patrones. El conjunto de muestras de calibración usado para construir estos modelos debe ser representativo de la variación en las propiedades de la muestra que se encuentran en lotes de producción típicos, para asegurar que se obtengan resultados cuantitativos representativos.

El algoritmo más usado en estas calibraciones se conoce como regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS).

**Tabla 4.** Análisis a realizar por el laboratorio de procesamiento.

Tipo de análisis	Método	Propiedad y variables determinadas
Humedad y material volátil	AOCS Ca 2b-38	Contenido de agua y sustancias volátiles.
Índice de deterioro a la blanquebilidad	MPOB Test methods, 2005, p. 414	Se precisa la absorbancia entre el producto de carotenos y carbonilos.
Determinación de ácidos grasos libres	AOCS Ca 5a-40	Neutralización de sustancias ácidas libres a partir de un álcali normalizado.
Determinación del porcentaje de impurezas insolubles en hexano o éter de petróleo	AOCS Ca 3a-46	Arrastre de aceite y separación de sólidos o solutos insolubles en un solvente orgánico.
Pérdidas de aceite	CenML-S3-Pac1/ CenML-S3-Pac4	Método de extracción Soxhlet y determinación gravimétrica del aceite.
Gestión del instrumento de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) y desarrollo de modelos de predicción	AOCS Analytical Guidelines Am 1a-09. Revised 2017	Consideraciones, procedimientos e indicadores matemáticos para estadística de modelos de predicción en general
Valor de índice de yodo precalibrado a través de equipo FT-NIT	AOCS Standard Procedure Cd 1e-01. Revised 2017	Procedimiento estándar para calibración de equipo en lo referente a modelo de predicción de índice de yodo
Manual de procedimientos de laboratorio de plantas de beneficio-Cenipalma	Basado en manual Palm Oil Factory Process Handbook Part 3	Contiene indicaciones sobre análisis de referencia para determinación de pérdidas en matrices sólidas

## Resultados primera fase: laboratorios de Cenipalma

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al generar los modelos de predicción en los equipos NIR FLEX N500 y NIR Proximate, en las instalaciones del laboratorio de procesamiento de Cenipalma. Las aplicaciones desarrolladas corresponden a:

- Modelos de predicción para tusa prensada, fibra y CPO en equipos NIR Flex y NIR Proximate.
- Modelos para perfil de ácidos grasos: ácido palmítico y ácido oleico
- Identificación de origen cultivares mediante análisis PCA de muestras (componentes principales).

## Modelos de predicción para tusa prensada, fibra y CPO en equipos NIR Flex y NIR Proximate

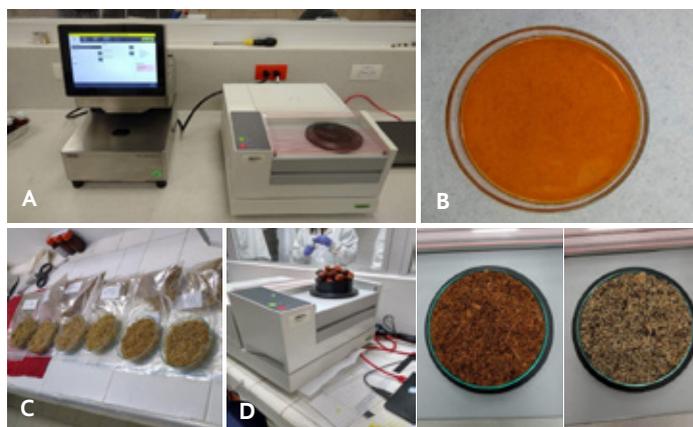
### Medidas de referencia

En la Tabla 5, se presentan los resultados de estadística descriptiva para los parámetros de referencia obtenidos en estas matrices de estudio, en donde se evidencia el alto grado de variabilidad de las muestras, con coeficientes de variación mayores o iguales al 50 % para la mayoría de ellos, además del amplio rango que presentan estos parámetros.

### Firmas espectrales

En la tabla 6, se muestran los espectros obtenidos para las muestras de tusa prensada, fibra y CPO.

**Figura 11.** A. Montaje de los equipos NIRFLEX N500 y NIR Proximate en laboratorio B. Montaje de muestras de aceite de palma crudo. C. Montaje de muestras de tusa prensada. D. Montaje de muestras de frutos, mesocarpio y almendra



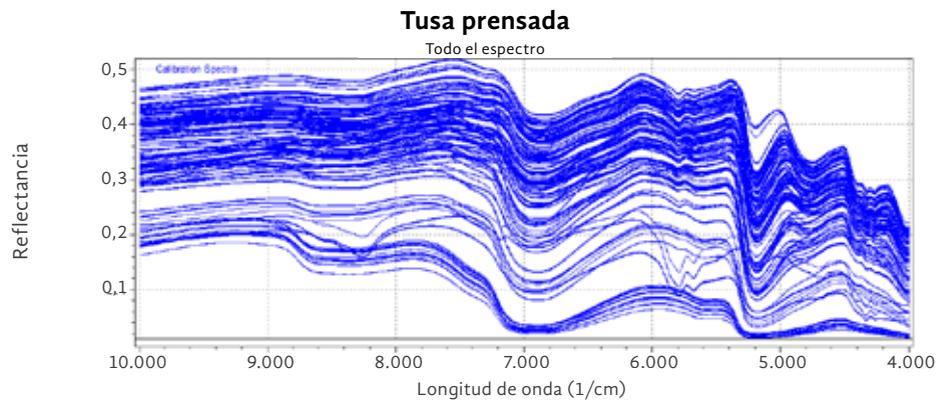
**Tabla 5.** Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos para las medidas de referencia en muestras de tusa prensada y fibra.

	Tusa prensada		Fibra		CPO			
	Humedad (%)	Pérdida de aceite (% AC/SSNA)	Humedad (%)	Pérdida de aceite (% AC/SSNA)	AGL (% ácido palmítico)	Humedad (%)	DOBI	Impurezas (% AC/SSNA)
Media	12.075	3,68	17.045	6,16	5.979	0,126	2.345	0,088
Desviación	6.898	2,57	10.979	2,31	3.323	0,05	0,34	0,13
CV	0,571	0,70	0,644	0,38	0,56	0,41	0,15	1,46
Mín.	4.540	0,46	4.104	3,27	0,78	0,03	1,49	0,0038
Máx.	37.770	10,94	38.840	13,66	14,43	,29	3,20	0,7037

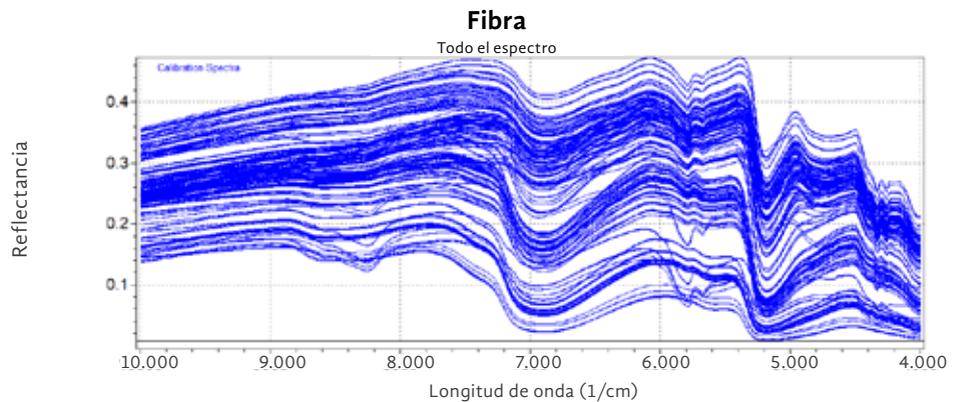
**Tabla 6.** Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos para las medidas de referencia en muestras de tusa prensada, fibra y CPO.

	Tusa prensada	Fibra	CPO
Cantidad de muestras analizadas	107	106	527

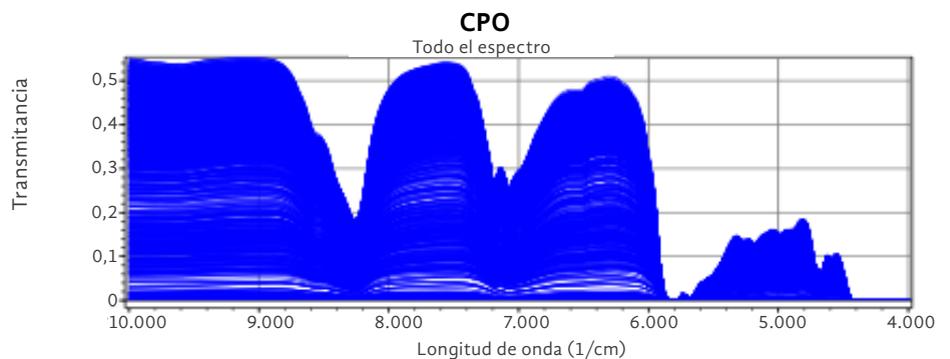
**Figura 12.** Respuestas espectrales de muestras de tusa prensada. (NIRCal<sup>6</sup>)



**Figura 13.** Respuestas espectrales de muestras de fibra. (NIRCal)



**Figura 14.** Respuestas espectrales de muestras de CPO. (NIRCal)



6 NIRCal: es un potente paquete de *software* quimiométrico que permite desarrollar métodos NIR que ofrecen resultados predictivos rápidos y confiables.

## Modelos de predicción utilizando equipos NIR

La Tabla 7 corresponde a los resultados para los parámetros estadísticos de los modelos construidos para tusa prensada y fibra, donde:  $R^2$  corresponde al coeficiente de determinación, RMSEC al error cua-

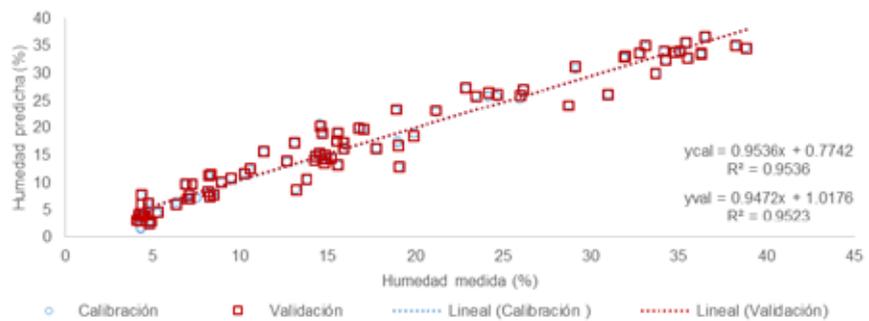
drático medio de la calibración y RMSEP al error cuadrático medio de la predicción.

**Nota:** Para la construcción de los modelos de pérdida de aceite en ambas matrices fueron incluidas muestras de Colombia y Malasia.

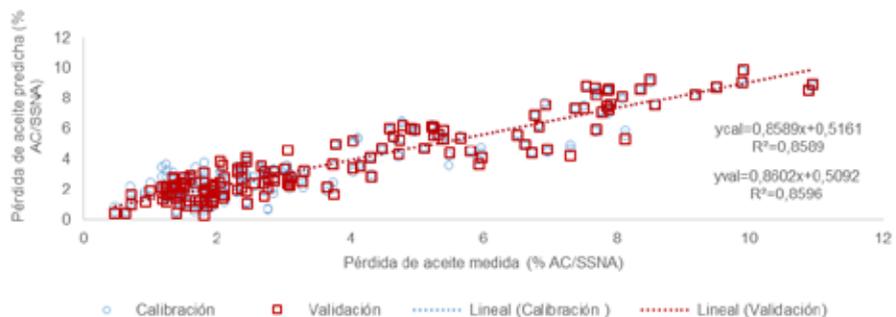
**Tabla 7.** Resultados de los parámetros obtenidos para los modelos de humedad y pérdida de aceite en tusa prensada y fibra.

Matriz	Parámetro	Calibración		Validación	
		R2	RMSEC	R <sup>2</sup>	RMSEP
Fibra	Humedad	0,95	2,35	0,95	2.387
	Pérdida de aceite	0,89	0,779	0,89	0,763
Tusa prensada	Humedad	0,90	2,12	0,90	2,16
	Pérdida de aceite	0,86	0,959	0,86	0,961
CPO	Humedad	0,78	0,032	0,77	0,033
	AGL	0,99	0,487	0,99	0,49
	DOBI	0,87	0,177	0,84	0,167
	Impurezas	0,95	0,039	0,95	0,039

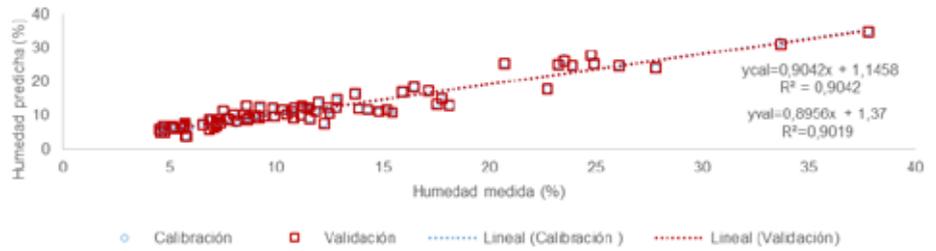
**Figura 15.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de humedad de fibra



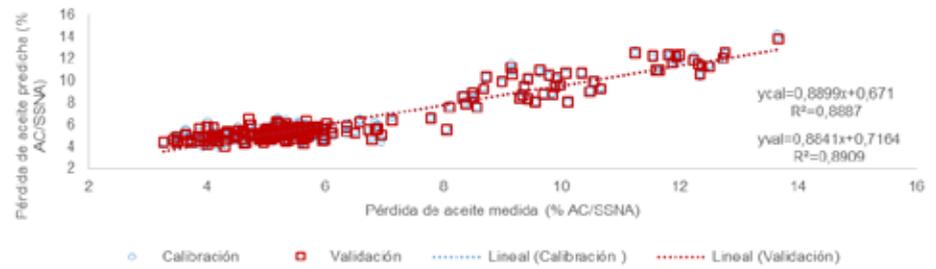
**Figura 16.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de pérdida de aceite en tusa prensada



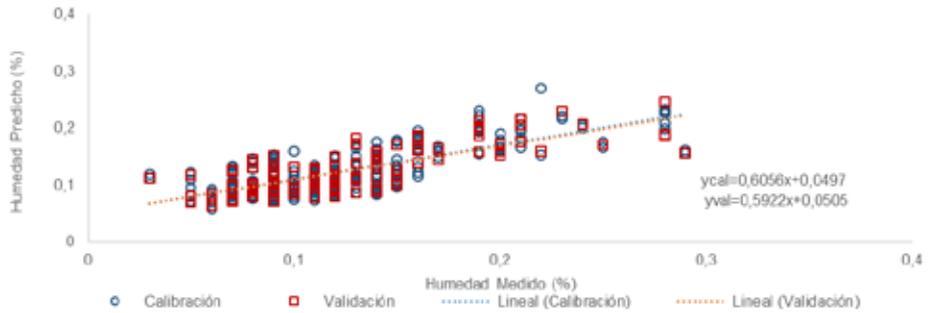
**Figura 17.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de humedad de tusa prensada



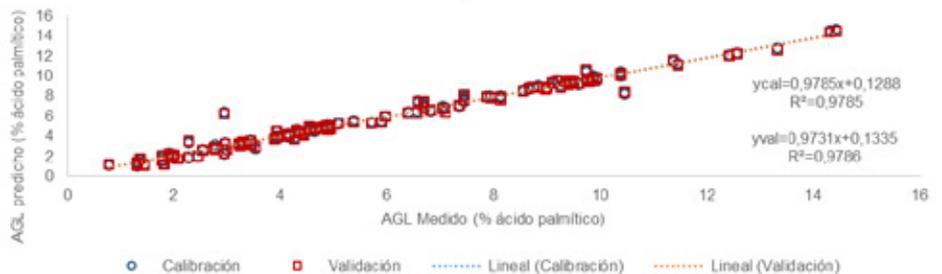
**Figura 18.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de pérdida de aceite en fibra



**Figura 19.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de humedad de CPO



**Figura 20.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de AGL de CPO



## Modelos para perfil de ácidos grasos: ácido palmítico y ácido oleico

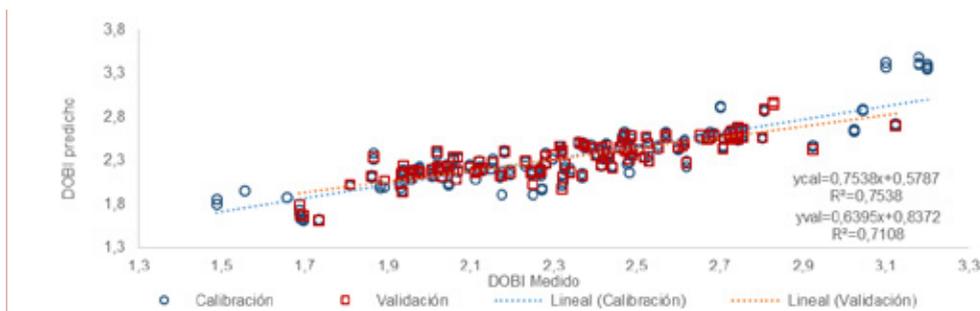
Para las muestras de mesocarpio seco fue posible determinar el perfil de ácidos grasos y se decidió construir calibraciones para los resultados de ácido palmítico y ácido oleico, pues estos resultan ser los

predominantes (de mayor cantidad e interés) en la matriz de estudio.

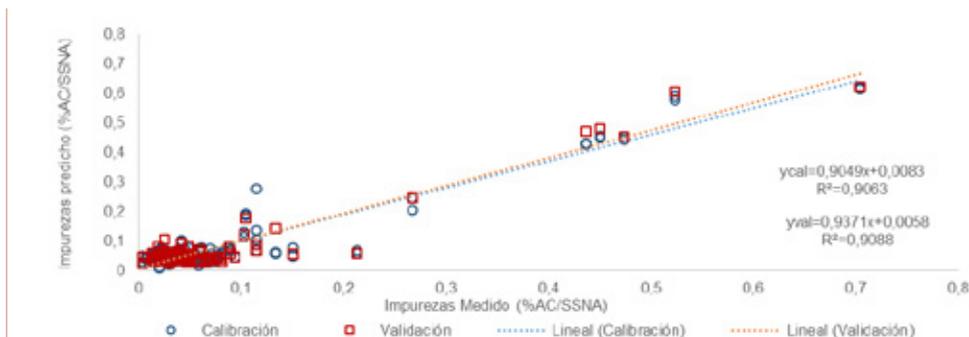
En la Tabla 8 se presentan los valores de referencia para los dos parámetros determinados en el perfil de ácidos grasos.

En la Tabla 9 se encuentran los estadísticos correspondientes a los modelos de ácido palmítico y oleico para muestras de mesocarpio seco.

**Figura 21.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de DOBI de CPO



**Figura 22.** Datos medidos vs. predichos para el modelo de impurezas de CPO



**Tabla 8.** Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos para las medidas de referencia (perfil de ácidos grasos) en muestras de mesocarpio seco.

Parámetro	Media	Desviación	CV	Mín.	Máx.
Ácido palmítico	38,54	6,60	0,17	28,49	53,73
Ácido oleico	44,14	6,31	0,14	29,33	55,22

**Tabla 9.** Resultados de los parámetros estadísticos obtenidos para los modelos de ácido palmítico y ácido oleico en mesocarpio seco.

Matriz	Parámetro	Calibración		Validación	
		R <sup>2</sup>	RMSEC	R <sup>2</sup>	RMSEP
Mesocarpio seco	% Ácido palmítico	0,95	1.551	0,94	1.545
	% Ácido oleico	0,92	1.783	0,92	1.794

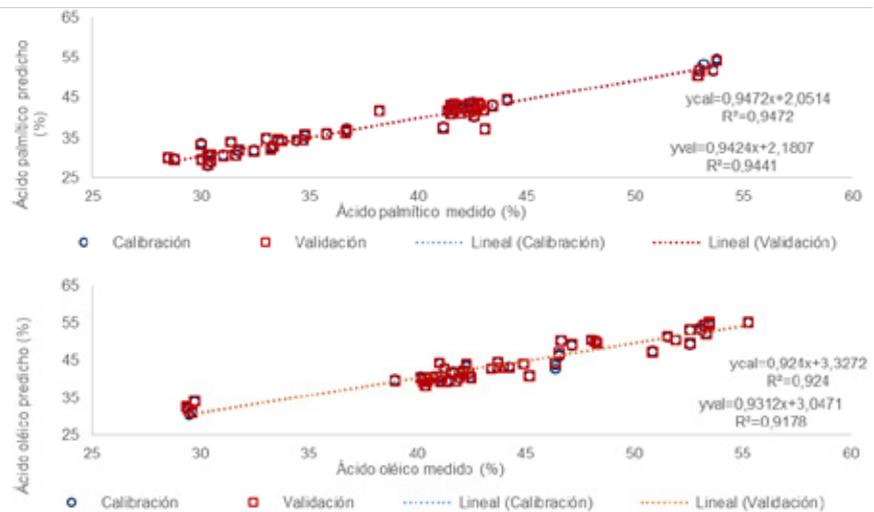
Para ambos modelos se obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0,9, denotando correlaciones altas, de igual manera los RMSE resultan ser aceptables, pues son mucho menores que la desviación estándar de los valores de referencia (Tablas 10 y 11). En cuanto al modelo de ácido palmítico, con estos resultados podemos hablar de comparación de métodos de referencia. En la Tabla 4 tenemos el modelo de AGL, leído como % ácido palmítico, en el que el método de referencia corresponde a una titulación, y en la Tabla 11 el modelo de % ácido palmítico, leído a partir del perfil de ácidos grasos en el que el método de referencia es cromatografía de gases; para ambos modelos se obtienen coeficientes de determinación altos y resultan tener capacidad de predicción muy buena; sin embargo el error resulta ser menor para el modelo de AGL, aunque cabe resaltar que el número

de muestras con las que fueron construidos los modelos no es la misma. Sin embargo, lo más importante es que para ambos métodos de referencia, los modelos NIR resultan ser una aproximación bastante buena y una alternativa viable a estos. En la Figura 23 se presenta la gráfica de validación cruzada para ambos modelos.

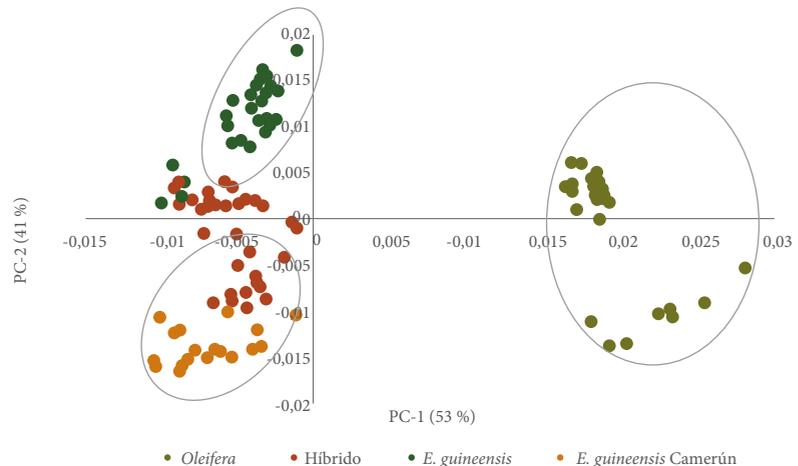
### Identificación de origen de cultivares mediante análisis PCA de muestras (componentes principales)

En el grupo de muestras de mesocarpio seco (Figura 24) fue posible contar con un total de 104 muestras, en las que se diferenciaron *E. guineensis* por su origen (Camerún y Angola), así como de muestras de diferentes orígenes para *oleifera* e híbrido.

**Figura 23.** Datos medidos vs. predichos para los modelos de ácido palmítico y ácido oleico



**Figura 24.** Análisis de componentes principales para las muestras de mesocarpio seco



A partir de los dos primeros componentes principales del PCA con un 94 % de la varianza explicada, se puede observar que el grupo de muestras de oleífera es fácilmente diferenciable del resto de cultivares, de manera similar como ocurrió con las muestras de mesocarpio picado y licuado. Sin embargo, es importante resaltar que se encontró diferencia espectral entre muestras por su origen, es decir, muestras de mesocarpio seco de *E. guineensis* Camerún (que se encuentran en el PC-2-negativo) se pueden discriminar fácilmente del grupo de muestras de *E. guineensis* Angola (que se encuentran en el PC-2-positivo). Por lo tanto, el uso de firmas espectrales podría ser una herramienta robusta de clasificación de muestras de mesocarpio de fruto de palma de aceite por cultivar (material) o por origen, al igual que en muestras de almendra seca y molida. Este desarrollo se encuentra vigente y posteriormente se fortalecerá con muestras de CPO procedente de diversas partes del país, con el fin de conformar un

modelo de trazabilidad de aceites, herramienta de gran utilidad para empresas refinadoras y entidades estatales, entre otros.

## Resultados segunda fase: laboratorios en plantas de beneficio

La segunda fase del proyecto consta de la evaluación de los equipos NIR en planta de beneficio. Durante el proceso de entrega, se socializaron los manuales operativos estándar (SOP) para estos equipos. Los analistas de laboratorio se encargaron de la operación de los mismos. Entre los puntos a considerar durante la preparación de muestras en las cajas Petri, la superficie del cristal debía quedar cubierta por el producto, sea líquido o sólido. Otro aspecto relevante era la limpieza de la cristalería utilizando alcohol y paños suaves. En las figuras 25 y 26 se indican los pasos para análisis de muestras.

**Figura 25.** Toma de muestras y preparación de equipo NIR Flex N500 en Palmas del Cesar



Equipos NIR en laboratorios  
 • NIR FLEX N500 (Palmas del Cesar)  
 • NIR PROXIMATE (PPW, Monterrey y Palmatraz)

Muestras de aceites y sólidos en cajas Petri

Proceso de calibración y ajuste de referencia (10 minutos 1 vez al día)

**Figura 26.** Carga de muestra en equipo y posterior análisis en un minuto



Carga de muestra en un equipo

Muestra en equipo lista para analizar (un minuto para leer muestra)

Selección del aplicativo y resultados en un minuto (por ejemplo, para tusa se muestran resultados de humedad y pérdida de aceite)

De forma simultánea, el equipo NIR Proximate fue enviado inicialmente a las plantas: Palmeras de Puerto Wilches, Extractora Monterrey; finalmente a la planta Palma y Trabajo S. A. S. Palmatra (del grupo Daabon) (Figura 27).

### Modelos de predicción, uso y ajuste en equipos NIR FLEX N500 y NIR Proximate

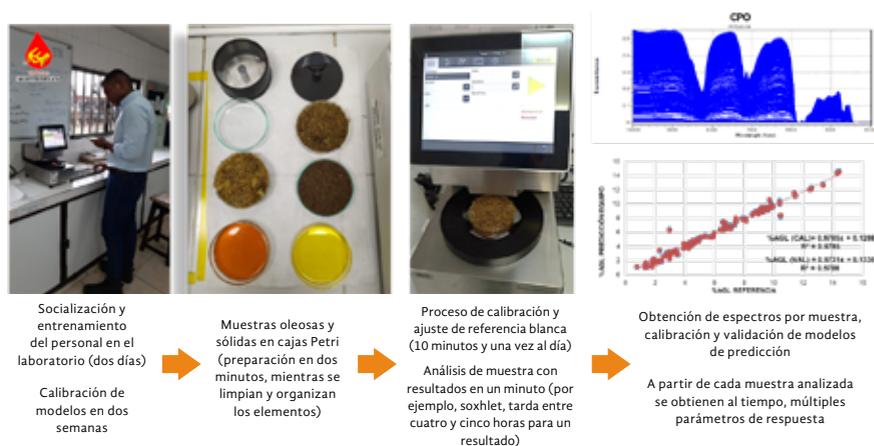
En la Tabla 10 se han consolidado los modelos de predicción por matriz (líquida y sólida), indicando los estadísticos para calibración de modelos y la validación cruzada. Esta tabla contiene modelos de alta confiabilidad para cultivares *E. guineensis*.

En la Tabla 11 se muestran los modelos en proceso de conformación para productos y subproductos procedentes de cultivares híbridos.

### Análisis de oportunidades por implementación de tecnologías NIR

Los equipos NIR surgen como una alternativa efectiva para abordar la obtención del indicador de pérdidas diferenciado por producto y sección del procesamiento de racimos, incluso con esta tecnología es posible monitorear parámetros de calidad del aceite, y no menos importante el seguimiento de pérdidas de aceite.

**Figura 27.** Preparación y análisis de muestras, a través del equipo NIR Proximate para productos y subproductos de cultivares híbridos



**Tabla 10.** Modelos generados a partir del análisis de componentes oleosos y sólidos para cultivares *E. guineensis*.

Matriz	Parámetro	Número de muestras	Calibración		Validación cruzada	
			R <sup>2</sup>	SEC	R <sup>2</sup>	SECV
Fibra	Humedad	106	0,95	2,35	0,95	2,387
	Pérdida de aceite	67	0,89	0,779	0,89	0,763
Tusa prensada	Humedad	107	0,904	2,12	0,902	2,15
	Pérdida de aceite	87	0,86	0,959	0,86	0,961
CPO	Humedad	185	0,78	0,032	0,77	0,033
	AGL	131	0,99	0,487	0,99	0,49
	DOBI	154	0,87	0,177	0,84	0,167
	Impurezas	93	0,95	0,039	0,95	0,039

Continúa

Matriz	Parámetro	Número de muestras	Calibración		Validación cruzada	
			R <sup>2</sup>	SEC	R <sup>2</sup>	SECV
CPKO	AGL	94	0,99	0,07	0,96	0,07
	Impurezas	94	0,92	0,0002	0,69	0,0003
Torta	Humedad	36	0,99	0,17	-	0,6
	Pérdida de aceite	36	0,98	0,39	-	0,64
Frutos intactos	Humedad	62	0,94	2,036	0,94	2,01
	Aceite a mesocarpio seco	62	0,95	4,364	0,95	4,447
Mesocarpio picado	Humedad	62	0,97	1,367	0,97	1,397
	Aceite a mesocarpio seco	62	0,99	2,259	0,98	2,327
Mesocarpio licuado	Humedad	62	0,99	0,816	0,99	0,855
	Aceite a mesocarpio seco	62	0,99	2,021	0,99	2,06
Mesocarpio seco	Aceite a mesocarpio seco	104	0,99	1,755	0,99	1,79
	% Ácido palmítico	55	0,9472	1,551	0,9441	1,545
Almendra seca	Aceite a almendra seca	46	0,99	0,549	0,99	0,56
Cuesco seco	Aceite a cuesco seco	46	0,89	0,454	0,88	0,46

**Tabla 11.** Modelos generados a partir del análisis de componentes oleosos y sólidos para cultivares híbridos O<sub>x</sub>G.

Matriz	Parámetro	Calibración		Validación cruzada	
		R <sup>2</sup>	SEC	R <sup>2</sup>	SECV
Fibra	Humedad	0,84	1,69	0,76	2,1
	Pérdida de aceite	0,99	0,21	0,96	0,41
CPO	Humedad	0,77	0,01	0,61	0,02
	AGL	0,846	0,1	0,74	0,13
	Impurezas	0,9	0,002	0,83	0,004
Expellers	Humedad	0,931	0,31	0,91	0,36
	Impregnación	0,9	0,65	0,87	0,76

**Figura 28.**  
Determinación de oportunidad económica respecto a costo de operación del laboratorio (no incluye mano de obra)

Costos procedimiento tradicional		Costos con equipo NIR	
ÍTEM	Costo \$/año	ÍTEM	Costo \$/año
Reactivos, permisos	\$ 25 millones	Materiales y suministros	\$ 2 millones
Materiales y suministros	\$ 2,5 millones	Mantenimiento y calibración	\$ 5,6 millones
Energía	\$ 3,5 millones	Total / año	\$ 7,6 millones
Mantenimiento y calibración	\$ 5 millones		
Total / año	\$ 36 millones		

Diferencia entre métodos convencionales y mediante NIR:  
 $36 \text{ millones COP} - 7,6 \text{ millones COP} = 28,4 \text{ millones COP}$

El tiempo de recuperación sería:  
 $170 \text{ millones COP} / 28,4 \text{ millones COP} = 6 \text{ años}$

De acuerdo con la Figura 28, el costo asociado a la operación e insumos en un laboratorio de planta de beneficio por la utilización de procedimientos tradicionales, aproximadamente es 36 millones COP, respecto a los 7,6 millones anuales por operación del equipo NIR Proximate, por ende la diferencia es de 28,4 millones COP. El costo de inversión estimado se encuentra entre 130 y 160 millones COP<sup>7</sup>. Dentro del cálculo no se incluye la mano de obra del personal de laboratorio, dado que la implementación de la tecnología se ha pensado para optimizar procesos y obtener más parámetros de forma inmediata, lo cual conlleva a especializar el personal en lo referente a análisis de datos en laboratorio.

En el escenario representado en la Figura 29, se establece una planta de beneficio cuya capacidad de procesamiento es 30 t RFF/ha, cuyas muestras a analizar serían la fibra de prensado (prensas de CPO de 9 t RFF/ha) y torta de palmiste (prensa de aceite de palmiste). Si se considera el incremento promedio de pérdidas de aceite en el 1 % respecto al escenario diario convencional para ambos tipos de equipos, en donde la diferencia es generada por problemas técnicos con los equipos y calidad de los racimos, por ende, el indicador de pérdidas de CPO se sitúa por encima de 0,17 % aceite/RFF y las pérdidas de CPKO estarían alrededor de 0,22 % aceite/RFF, equivalente a un potencial de 2,1 millones COP al día. Este margen de ahorro posible podría alcanzarse si la planta toma decisiones

oportunas luego de analizar muestras de fibra de prensado y torta de palmiste con mayor frecuencia respecto a la actualidad, debido a que las plantas de beneficio generalmente conocen dichos indicadores de pérdidas al día siguiente del proceso y sobre muestras compuestas del día (mezcla de muestras del día). Una decisión que podría tomarse para mitigar el impacto por las pérdidas de aceite se relaciona directamente con la detención parcial o total del proceso para ajustes técnicos en equipos. Esto se puede hacer estableciendo como punto de comparación el costo nominal promedio de 1,6 millones COP<sup>8</sup> por hora de proceso, *versus* el ahorro potencial por reducción de pérdidas de aceite, logrando mayores beneficios al minimizar el impacto por dichas pérdidas, las cuales han sido medidas a través de equipos NIR, incluso monitoreadas posterior al proceso de parada de equipos. En este escenario, el margen potencial de ahorro que se podría alcanzar estaría alrededor de \$ 50,5 millones COP al mes, considerando 3 prensas de 9 t RFF/h y una prensa de palmiste. Finalmente, el tiempo de recuperación del costo de inversión se estima entre 3 y 5 meses.

## Conclusiones

Un resultado de gran impacto de la alianza de investigación entre Cenipalma, Büchi y las plantas de beneficio en la Zona Central palmera, definitivamente es la optimización de la determinación de los

7 Sujeto a términos y condiciones entre empresa interesada y Büchi.

8 Costo nominal promedio para procesar 1 t CPO determinado para una planta con capacidad de 30 t RFF/h.

**Figura 29.** Determinación de oportunidad económica respecto a costo por pérdidas de aceite

PÉRDIDA EN PRENSA DE 9 tRFF/h	NORMAL	INCREMENTO PÉRDIDA 1 PUNTO
RFF PROCESADO DÍA POR PRENSA	240	240
% Fibras / RFF	13,00	13,00 %
% Aceite / SNNA (Fibras)	6,50 %	7,50 %
% SSNA / Fibras	55,00 %	55,00 %
% Aceite / RFF (Fibras)	0,46 %	0,54 %
Aceite perdido (t CPO)	1,12	1,29
	DIFERENCIA (t CPO)	0,17
	ESTIMACIÓN COSTO (DIARIO)	\$ 462.083

PÉRDIDA EN TORTA DE PALMISTE	NORMAL	INCREMENTO PÉRDIDA 1 PUNTO
RFF PROCESADO TOTAL DÍA (r RFF)	720	720
% Aceite PKO / Torta palmiste	8,50 %	9,50 %
% Torta Palmiste / RFF	3,00 %	3,00 %
Aceite PKO / RFF	0,26 %	0,29 %
Aceite perdido (t CPKO)	1,84	2,05
	DIFERENCIA (t CPKO)	0,22
	ESTIMACIÓN COSTO (DIARIO)	\$ 718.270

ESTIMACIÓN TOTAL AL MES DE PROCESO (24 DÍAS)	
TOTAL PÉRDIDAS EN PRENSADO CPO (3 PRENSAS CAPACIDAD 9 tRFF/h)	\$ 33.269.996
TOTAL PÉRDIDAS EN TORTA DE PALMISTE	\$ 17.238.469
TOTAL PÉRDIDAS EN LOS 2 PUNTOS DE PROCESO	\$ 50.508.465

RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN EN EQUIPO NIR PROXIMATE	ENTRE 3 Y 5 MESES
---	-------------------

parámetros de calidad de los aceites e identificación de pérdidas en los subproductos obtenidos a diario en el procesamiento de racimos. Las tecnologías constituidas dentro de la espectrometría y análisis quimiométrico de matrices, abren un nuevo horizonte de herramientas que ayudarán a reducir la brecha entre la eficiencia de los procesos y la calidad de los mismos, logrando alcanzar una de las metas que la agroindustria ha buscado: identificar y reducir al máximo las pérdidas de aceite, al igual que conocer cada vez más las características físico-químicas de los aceites extraídos en planta, dada la gran variabilidad genética con la cual cuenta Colombia y su cultivo de palma de aceite.

A modo de resumen en general, en la Tabla 12 se indican las diferencias más representativas entre las técnicas convencionales existentes en los laboratorios de las plantas, respecto a los beneficios que se tendrían al contar con equipos NIR.

Entre el inventario actual de modelos de predicción y el horizonte de nuevos análisis posibles, a través de la tecnología NIR, a continuación, se mencionan los parámetros de gran interés para plantas de beneficio,

empresas refinadoras, comercializadoras de aceites, entre otros actores:

- Contenido de aceite
- Humedad
- AGL
- Índice de yodo
- Índice de anisidina
- Índice de peróxidos
- Color
- DOBI
- Carotenos
- Índice de fósforo
- Perfil de ácidos grasos
- Potencial de aceite de fruto crudo (molido) para *E. guineensis* e híbridos.
- Agua tratada de calderas
- Agua de STAR (DBO y compuestos orgánicos)

**Tabla 12.** Comparación entre técnicas convencionales de laboratorio y tecnología NIR.

Aspecto	Técnica convencional	Técnica NIR
Tiempo del análisis	Entre 4 y 5 horas para contenido de aceite. Entre 10 y 15 minutos para otros parámetros	Al menos 1 minuto sin importar tipo de muestra
Precisión/exactitud	Muy alto, dado que son los métodos de referencia	Alto, gracias a la reproducibilidad en los resultados
Costo por análisis	Alto	Bajo
Información por análisis	Distintos procedimientos para cada parámetro que se desee medir	Una sola medición genera valores de varios parámetros al tiempo
Tratamiento de la muestra	Complejo por los cuarteos, pesajes y uso de reactivos químicos	Simple, no requiere pesaje ni uso de reactivos químicos dado que depende del análisis óptico de luz sobre matrices
Permisos	Certificado de carencia (Antinarcoóticos SICOQ). Costo de proceso y disposición de tiempo	No requiere
Ocupación del analista	Alta	Baja (permite que realice más muestreos y/o controles de proceso y análisis de información obtenida)
Seguridad	Riesgo de incendios y exposición a sustancias químicas (p. ej. hexano y ácidos)	No usa productos químicos
Ambiental	Genera residuos líquidos, sólidos y gases peligrosos	No genera residuos peligrosos
Operatividad	Requiere de múltiples equipos y elementos en laboratorio	NIR Proximate: todo en uno (PC + sensor + puerto conexión a internet para soporte remoto)
Oportunidad para toma de decisiones	Los resultados más importantes como pérdidas de aceite, se conocen al transcurrir al menos 4 horas de proceso	Una vez analizada la muestra, se pueden tomar decisiones cruciales como detener el proceso para ajustar los equipos con el fin de reducir el indicador de pérdidas bajo monitoreo

## Agradecimientos

Se brinda especial agradecimiento al comité asesor de plantas de beneficio de la Zona Central, gerencia y dirección de planta y personal de laboratorio en las plantas Palmas del Cesar, Palmeras de Puerto Wilches, Extractora Monterrey y Palma y Trabajo S. A. S. A Norman

Urrego, investigador de Cenipalma, responsable del laboratorio de Bioquímica en el Campo Experimental Palmar de La Vizcaína. A la empresa Polco S. A. S. por su apoyo en procesos de importación y soporte técnico. Por parte de Büchi, se brinda especial agradecimiento a Margarete de Koning, gerente de producto NIR, por el soporte técnico brindado durante el proyecto.

## Bibliografía

- Burns, D. A. & Ciurczak, E. W. (2007). *Handbook of Near-Infrared Analysis*. CRC Press.
- Cala, S. L., Yáñez, A. & García, J. A. (2011) *Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio-Cenipalma*. Bogotá, Colombia: Centro de Investigación en Palma de Aceite-Cenipalma.
- Durán, Q., Sierra, G. A. & García, N. (2004). Potencial de aceite en racimos de palma de aceite de diferente calidad y su influencia en el potencial y extracción de aceite en la planta de beneficio. *Palmas*, 25(2), 501-508.
- Fedepalma. (2019). Sispa: Sistema de Información Estadística del Sector Palmero. Recuperado de <http://sispaweb.fedepalma.org/>. [Consultado: 20-sep-2019].
- Fedepalma. (2016). *Mejores prácticas agroindustriales del cultivo de la palma de aceite en Colombia*. 1 ed. Bogotá, Colombia.
- García-Sánchez, A. Ramos Martos, N. & Ballesteros, E. (2005). Comparative Study of Various Analytical Techniques (NIR and NMR spectroscopies, and Soxhlet extraction) for the Determination of the Fat and Moisture Content of Olives and Pomace Obtained from Jaén (Spain). *Grasas y Aceites*, 56(3), 220-227.
- Linden, G. (1996). *Analytical Techniques for Foods and Agricultural Products, Analysis and Control Methods for Foods and Agricultural Products* (USA). VCH.
- Malaysian Palm Oil Board (MPOB). (2019). *Economics & Industry Development Division*. Recuperado de <http://bepi.mpob.gov.my/>.
- Norris, K. H. (1996). History of NIR. *J. Near Infrared Spectrosc*, 4(1) 31-37.
- Ríos-Castro, B. M., Moreno-Bondi, A. M. & Suau, S. (2012). *Técnicas espectroscópicas en química analítica: aspectos básicos y espectrometría molecular*. España.
- USDA. (2018). *Oilseeds markets and trades*.
- Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM). (1986). *Ministry of Primary Industries of Malaysia, Laboratory and milling control*. Kuala Lumpur, Malaysia: Percetakan Seasons Sdn Bhd.